

# 最小費用 Hyperpath 探索アルゴリズムによる鉄道経路選択モデルの選択肢集合形成\*

## Creating Paths Sets Using Hyperpath for Railway Route Choice Model\*

柳沼 秀樹\*\*・福田 大輔\*\*\*・Schmöcker Jan-Dirk\*\*\*\*・倉内 文孝†

by Hideki YAGINUMA\*\*・Daisuke FUKUDA\*\*\*・Jan-Dirk Schmöcker\*\*\*\*・Fumutaka KURAUCH†

### 1. 研究の背景と目的

我が国の大都市圏における鉄道需要予測の実務では、非集計行動モデルに基づく鉄道利用者の経路選択行動の記述と将来予測への適用がなされてきた<sup>1)</sup>。経路選択モデルの特定化においては、経路重複構造を考慮するための誤差項の構造化など、高密度なネットワークに対応した様々な改良が行われてきた<sup>2),3)</sup>。

一方、鉄道経路選択肢集合の設定に関しては、後述するように様々な基準に基づいた設定方法が提案されており、標準ルールは確立していない。実務においても、乗車時間 (in-vehicle travel time) に基づく  $k$  番目経路探索基準に基づいた選択肢集合の設定が行われる場合が多い。しかし、鉄道ネットワーク上での経路選択行動においては、道路ネットワーク上のそれと異なり、所要時間 (乗車時間) という要因のみならず、運行頻度 (待ち時間)、車両の容量制約、混雑による不効用、遅延による所要時間や停車時間の変動、common lines problem 等<sup>4)</sup>の影響に関しても、経路選択肢集合の設定において考慮される必要があると考えられる。

本研究では、鉄道経路選択肢集合の設定方法についての新たな試みを行うものである。具体的には、公共交通ネットワーク配分で用いられてきた hyperpath 概念<sup>5),6)</sup>に基づいた経路選択肢集合設定方法を提案する。これにより、乗車時間による  $k$  番目経路探索を用いた選択肢集合設定では考慮できなかった運行頻度や common lines problem のような、鉄道に特有の要因を加味した包括的な選択肢集合設定が可能となると期待される。

### 2. 既往研究の整理

ここでは鉄道経路選択モデルの選択肢設定に言及している既往研究について簡単な整理を行う。また、道路ネットワークを対象にした近年の新たな手法についても簡単な整理を行う。

表 - 1 鉄道経路選択を対象とした選択肢集合の設定方法

文献	設定方法
屋井ら <sup>8)</sup>	(1) 所要時間が選択経路の2倍以上の経路を除く (2) 経路長が選択経路の1.8倍以上の経路を除く (3) 重複率が90%以上の経路を統合する
森田ら <sup>9)</sup>	$k$ 番目経路探索を行い、屋井ら基準を適用。
大石ら <sup>10)</sup>	初乗りおよび最終降車駅を2駅設定し、各駅から所要時間が短い5経路を設定。
金子ら <sup>11)</sup> Kato et al <sup>12)</sup>	(1) ゾーン間最短経路、複数のアクセス・イグレス駅を特定した $k$ 番目経路および現況再現性を勘案した経路を用いる (2) 上記手順を用いて経路の確定効用を基準とする設定。 (3) 現況再現性を勘案した経路設定を行わず、経路の確定効用より設定

表 - 1 に既往研究における鉄道の選択肢集合に関する設定基準についてまとめたものを示す。屋井ら<sup>8)</sup>はLOSと類似性基準に基づく選択肢集合の設定基準を提案している。LOSによる選別は表中(1)および(2)の2点を挙げている。また類似性基準による選別は、分析より得られた知見をもとに表中(3)のように設定している。森田ら<sup>9)</sup>は屋井らの基準を採用し、基準を満たす  $k$  番目最短経路を選択肢集合としている。大石ら<sup>10)</sup>は首都圏の通勤者を対象に行った鉄道利用に関するアンケートの集計分析から選択肢集合設定基準を導いている。金子ら<sup>11)</sup>およびKato et al<sup>12)</sup>では  $k$  番目経路に基づき3つの選択肢集合の設定方法を示している。これら既往研究手法は主に所要時間に着目しており、運行頻度等の公共機関特有の要因が反映されていない。

一方、道路ネットワークにおける経路選択モデルの選択肢集合設定に関しては、ラベリング法<sup>13)</sup>が早い段階から提案されている。これは例えば「所要時間が短い」や「右左折回数が最小」といったラベルを複数設定し、これらの条件を満たす経路を選択肢集合に加えてゆく手法である。山川ら<sup>14)</sup>はラベリング法とEBAを統合した選択肢集合の設定手法を提案している。Bierlaire and Frejinger<sup>15)</sup>はGPSデータを用いて道路リンクとのマッチングを行い、経路選択肢集合を推測する手法を開発している。

上記に整理した既往研究は共通して利用者の行動に基づいた集計分析や統計処理、さらには分析者の経験や主観から「行動ルール」を抽出し、それに基づいた選択肢集合の形成を行っていることが分かる。これら行動ルールは利用者の行動を理解する上で非常に有益な情報であるが、一般的な手法ではないため分析者により異なるアウトプットが生じる可能性がある。

\* キーワーズ：鉄道経路選択，選択肢集合，Hyperpath

\*\* 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻  
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-11  
TEL 03-5734-2577, FAX 03-5734-3578

\*\*\* 正会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

\*\*\*\* 正会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

† 正会員 岐阜大学工学部社会基盤工学科

### 3. Hyperpath を用いた選択枝集合設定手法の提案

本研究では、選択枝集合の設定をより一般的に行うため、分析者に依らず同一の選択枝集合が設定可能で比較的簡便なアルゴリズムとして実装可能なシステムティックな手法を検討する。そこで公共交通ネットワーク配分で用いられている hyperpath に着目した手法を提案する。hyperpath を用いた実ネットワークへの適用として、倉内ら<sup>16)</sup> は京都のバスネットワークに適用しており、料金制度変更によるサービス改善の評価を行っている。また、Schmöcker et al<sup>17)</sup> はロンドンの地下鉄ネットワークに適用しており、大規模な公共交通ネットワークでの実証研究も蓄積されつつある。

#### (1) Hyperpath

hyperpath は common liens problem により定義される経路集合である。ここで、common lines problem とは、頻度ベースで運行されている公共交通機関における特有の問題であり、「目的地に乗り場を共有している複数の路線を用いて到達することが可能な場合、それらの路線から魅力的な経路集合 (attractive set) を選択する問題」と定義される。Spiess and Florian<sup>5)</sup> は attractive set に含まれる経路集合を hyperpath と定義し、(1) 路線は頻度に基づいて運行されているため乗客に期待待ち時間が発生する、(2) 乗客はランダムに駅に到着し、最初に到着した路線に乗り場する、という仮定の下に期待所要時間が最小となる hyperpath を選択する最適戦略 (行動規範) を提案している。すなわち、hyperpath は通常の経路とは異なり「経路群」であり、乗車方法の組み合わせを意味している。例えば、発駅から着駅に2つの路線が通っているとしよう。このとき経路は路線1と路線2の2経路となるが、hyperpath は先に到着した路線に乗り場するという行動を考慮できるため、路線1かつ路線2という経路を加えた3つの乗車パターンを考えることができる。

ところで、我が国の鉄道は頻度ベースではなく時刻表に基づくスケジュールベースで運行されている。しかし首都圏などの大都市圏では鉄道サービスは高頻度で運行されており、近似的に頻度ベースと見なすことができる。そのため適用にはピーク時間帯のような高頻度かつ、ほぼ一定間隔で運行されていることが前提

条件となる。また、頻度ベースを仮定することにより静的に取り扱うことが可能となるメリットも有している。

#### (2) 最小費用 hyperpath 探索

出発地  $r$  と目的地  $s$  を結ぶ hyperpath を  $p$  とする時、ノード集合  $I_p$ 、リンク集合  $A_p$ 、および経路分岐確率  $T_p$  からなるグラフ  $H_p = (I_p, A_p, T_p)$  で表現される。図-1 は仮想ネットワークとそれをグラフモデルで表現したものである。なお、定式化および hyperpath 探索には既往研究に従い<sup>16),18)</sup> グラフモデルを基に行うとする。hyperpath  $p$  の一般化費用  $g_p$  は以下のような式で表わされる。ここでは所要時間と待ち時間のみ考慮している。

$$g_p = \phi \sum_{a \in A_p} \alpha_{ap} t_a + \psi \sum_{i \in I_p} \frac{\beta_{ip}}{F_{ip}} \quad (1)$$

ここで、

$t_a$ : リンク  $a$  の移動時間

$\phi$ : 乗車時間に関する時間価値パラメータ

$\psi$ : 待ち時間に関する時間価値パラメータ

$\alpha_{ap}$ : hyperpath  $p$  におけるリンク  $a$  の通過確率

$\beta_{ip}$ : hyperpath  $p$  におけるノード  $i$  の通過確率

第一項は所要時間による費用、第二項は待ち時間による費用を表している。また、一般化費用は分岐確率に従い確率的に表現される。 $1/F_{ip}$  はノード  $i$  における期待待ち時間を示しており、リンク  $a$  の運行頻度  $f_a$  を用いて以下のように表わされる。

$$1/F_{ip} = 1 / \sum_{a \in A_p} f_a \quad (2)$$

式1で示した期待一般化費用が最小となる hyperpath の算出は Dijkstra 法に準じた手法<sup>18)</sup> を用いて算出が可能である。

#### (3) 選択枝集合の設定

得られた hyperpath はあくまでも期待費用が最小となる「経路群」である。そのため、経路群を個別の経路に分解する作業が必要となる。そこで本研究では得られた hyperpath に対する  $k$  番目経路探索<sup>19)</sup> を行うことで経路を列挙し、選択枝集合を作成する。このとき各リンクには所要時間に式2の待ち時間を付加した一般化費用を用いて探索を行う。提案手法の手順をまとめると以下の2つのステップより構成される。

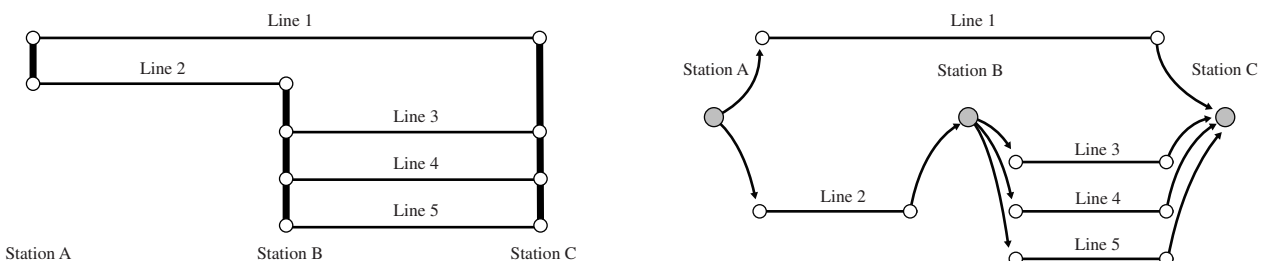


図-1 仮想ネットワークとグラフモデルによる表現

**Step1: 最小費用 hyperpath の探索**

対象ネットワークのグラフモデルを作成し、式 1 の期待一般化費用に基づいて hyperpath の探索を行う。

**Step2:  $k$  番目経路探索による hyperpath の分解**

得られた hyperpath の一般化リンク費用を算出し、 $k$  番目経路探索を用いて経路選択枝集合を作成する。

さらに、

**Step3: 行動モデルによる経路選択**

作成した選択枝集合を用いて非集計モデルを推定し、経路に需要を配分する。

といったステップを経て鉄道需要が予測される。

本手法を用いることで、システムティックに選択枝集合を設定することが可能となる。しかし、2つの時間価値パラメータの設定が必要であり、行動モデルと整合性を考慮した設定手法の検討が必要となる。

**4. 仮想ネットワークを用いた試算**

**(1) 提案手法の試算**

簡単なネットワークを用いて提案した手法の計算可

能性について検証を行う。ネットワークは先に示した図 - 1 を用いる。また、図 - 2 は仮想ネットワークにおける全乗車方法 15 パターンを示したものである。各乗車方法が経路群に相当し hyperpath として定義される。No.1 から No.4 までは通常の経路に対応しており、No.5 から No.15 までは乗車を組み合わせたものとなっている。例えば、No.9 は発駅 A において乗客は路線 1 と路線 2 の先に到着した方に乗車し、路線 1 に乗車した場合はそのまま着駅 C に向かい、路線 2 に乗車した場合は路線 3 に乗り換えて着駅 C に向かうことを意味している。想定した各路線の所要時間(分)および運行頻度(本/時)の値を表 - 2 に示す。

表 - 2 仮想データの設定値

路線	所要時間(分)	運行頻度(本/時)
Line 1	22	6
Line 2	12	6
Line 3	10	10
Line 4	12	10
Line 5	15	20

また、所要時間の時間価値  $\phi$  および待ち時間の時間価値  $\psi$  については金子ら<sup>11)</sup>が推定した MNL のパラメータを用いてそれぞれ 22 円/分、33 円/分と設定し、

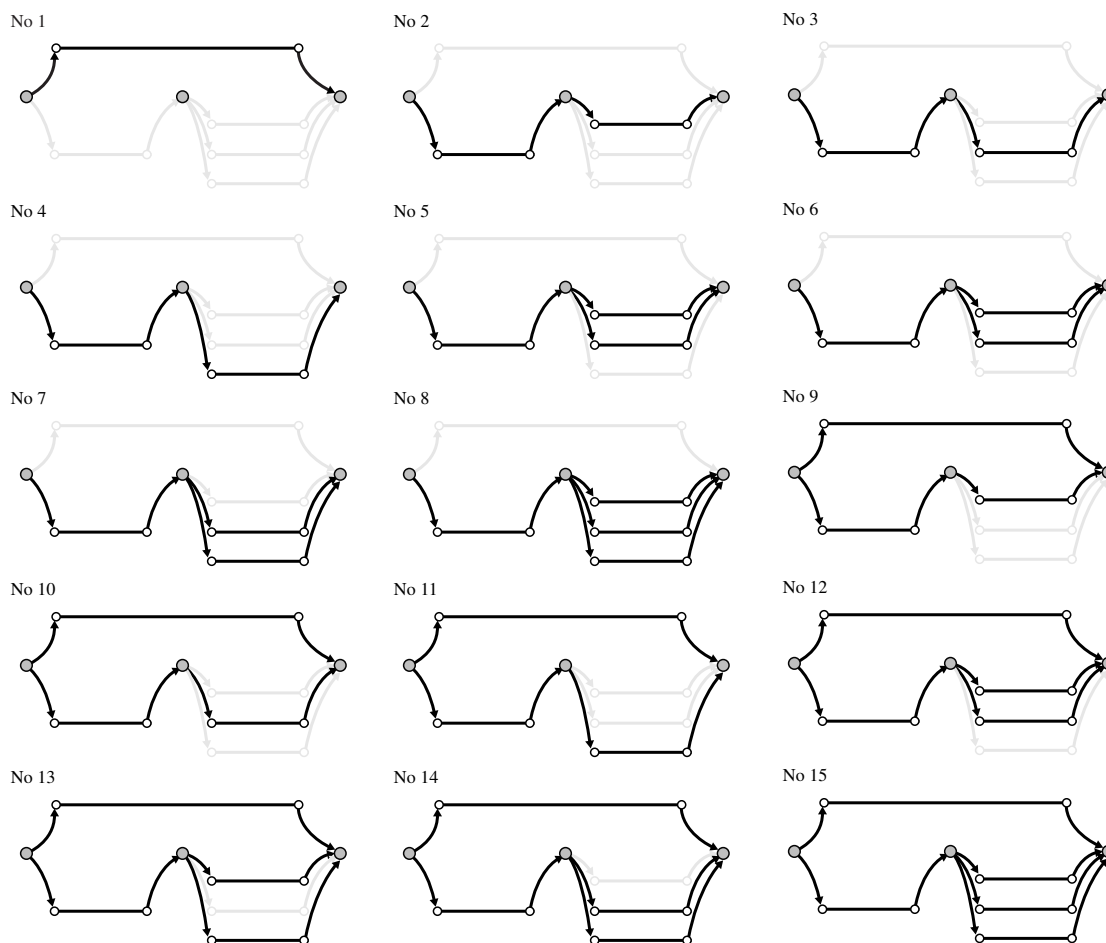


図 - 2 仮想ネットワークの全乗車方法

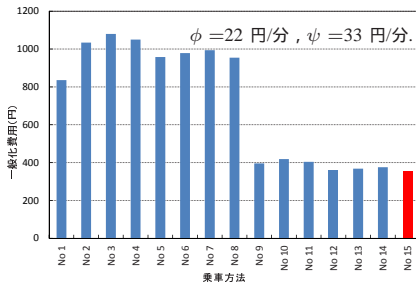


図 - 3 全乗車方法の一般化費用

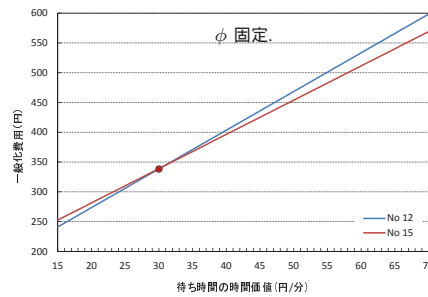


図 - 4 時間価値変化の感度分析

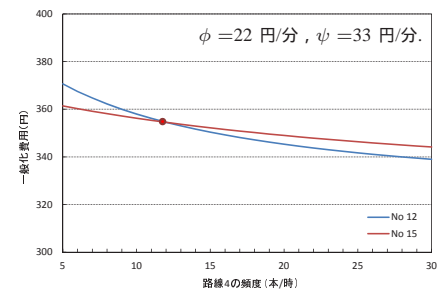


図 - 5 頻度変化の感度分析

一般化費用の算出を行った。図 - 3 に全乗車方法の一般化費用を示す。No.15 の乗車方法が最小となっており、期待費用最小 hyperpath となることが分かる。k 番目経路探索により経路を列挙すると、路線 1, 路線 2 と路線 3, 路線 2 と路線 3, および路線 2 と路線 4 の 4 経路が列挙され、これが経路選択肢集合となる。

ところで、図 - 3 から分かるように、No.9 から No.15 までの乗車方法については一般化費用の差が非常に小さい。これより、最小費用のみならず複数の hyperpath を考慮した選択肢集合の設定を検討する必要性が示唆される。

## (2) 提案手法の感度分析

はじめに時間価値の変化に着目した感度分析を行う。ここでは待ち時間の時間価値  $\psi$  に着目し、 $\psi$  を 15 円/分から 70 円/分まで 1 円/分刻みで計算を行った (図 - 4)。ここで図中の赤点は最小費用の変化点であり、この点の前後で hyperpath が変化することになる。 $\psi$  が 30 円/分までは No.12 が最小費用 hyperpath となるが、31 円/分以上は No.15 に変化している。 $\psi$  が高まることにより複数の路線を組み合わせた乗車方法が選択肢集合になることが分かる。すなわち、待ち時間価値が低い場合には所要時間の短い個別の経路が選ばれるが、高い場合には路線を組み合わせる乗車を行うため、選択肢集合が増大することを示唆している。

次に頻度の変化に着目した感度分析を行う。ここでは路線 4 の頻度を 5 本/時から 30 本/時まで変化させて計算を行った。図 - 5 の結果から、頻度が 12(本/時)を境に最小費用 hyperpath が No.15 から No.12 に変化することがわかる。ここから頻度の改善は一般化費用の低減につながり選択肢集合の変化につながることが示唆される。

## 5. 結論

本研究では hyperpath の概念に基づく選択肢集合の設定手法の提案と仮想データを用いた試算を行った。発表時には実ネットワークへの適用を行い、本手法で算出した選択肢集合を用いて非集計モデルによる経路選択の結果について紹介したい。

## 参考文献

- 1) 森地茂監修: 東京圏の鉄道のあゆみと未来, 運輸政策研究機構, 2000.
- 2) Yai, T., Iwakura, S. and Morichi, S.: Multinomial Probit with Structured Covariance for Route Choice Behavior, *Transportation Research Part B*, Vol.31, No.3, pp.195-207, 1997.
- 3) 日比野直彦, 兵藤哲朗, 内山久雄: 高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けた非 IIA 型経路選択モデルの特性分析 - 改良型 C-Logit モデルの提案 -, 土木学会論文集, No.765/ -64, pp.131-142, 2004.
- 4) Chiriqui, C. and Robillard, P.: Common Bus Lines, *Transportation Science*, Vol.9, pp.115-121, 1975.
- 5) Spiess, H. and Florian, M.: Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks, *Transportation Research Part B*, Vol.23, No.2, pp.83-102, 1989.
- 6) Nguyen, S. and Pallotino, S.: Equilibrium Traffic Assignment for Large Scale Transit Networks, *European Journal of Operational Research*, Vol.37, pp.176-186, 1988.
- 7) Prashker, J. N. and Bekhor, S.: Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: A review, *Transport reviews*, Vol.24, No.4, pp.437-463, 2004.
- 8) 屋井哲雄, 清水哲夫, 坂井康一, 小林亜紀子: 非 IIA 型選択モデルの選択肢集合とパラメータ特性, 土木学会論文集, No.702/ -55, pp.3-13, 2002.
- 9) 森田泰智, 日比野直彦, 内山久雄:  $C^*$ -Logit モデルを適用した鉄道ネットワーク配分分析 - 高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けて -, 鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail) 講演論文集, No.10, pp.391-394, 2003.
- 10) 大石洋也, 日比野直彦, 内山久雄: 鉄道経路選択分析における選択肢集合設定方法とパラメータ推計結果の関係に関する研究, 鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail) 講演論文集, No.10, pp.399-402, 2003.
- 11) 金子雄一郎, 加藤浩徳, 井上真志: 都市鉄道を対象とした経路配分手法の推計特性に関する比較分析, 土木計画学研究・講演集, No.36, 2007.
- 12) H Kato, Y Kaneko, M Inoue: Choice of Travel Demand Forecast models: Comparative Analysis in Urban Rail Route Choice, Presented at the European Transport Conference 17-19 Oct 07 in Leiden, The Netherlands.
- 13) Ben-Akiva, M. and Bergman, M. J. and Daly, A. J. and Ramaswamy, R.: Modelling inter urban route choice behaviour, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Delft, the Netherlands, 11-13 July 1984*, pp.299-330, 1984.
- 14) 山川佳洋, 羽藤英二: ラベリング法を用いた経路選択肢集合の有効性の検証, 第 28 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.297-300, 2008.
- 15) Bierlaire, M. and Frejinger, E.: Route choice modeling with network-free data, *Transportation Research Part C*, Vol.16, No.2, pp.187-198, 2008.
- 16) 倉内文孝, 嶋本寛, 王萍, 飯田恭敬: 最小費用 Hyperpath 探索アルゴリズムを用いたバスサービス評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.23, 2006.
- 17) Schmöcker, J. D. and Bell, M. G. H. and Kurauchi, F.: A quasi-dynamic capacity constrained frequency-based transit assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol.42, No.10, pp.925-945, 2008.
- 18) Kurauchi, F., Bell, M. G. H. and Schmöcker, J. D.: Capacity Constrained Transit Assignment with Common Lines, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol.2, No.4, pp.309-327, 2003.
- 19) Van der Zijpp, N. J. and Fiorenzo Catalano, S.: Path enumeration by finding the constrained K-shortest paths, *Transportation Research Part B*, Vol.39, No.6, pp.545-563, 2005.